第47卷 第1期
2024年1月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 47 No. 1
Jan. 2024

塔里木河“四源”洪水演变规律及成因分析

邬晓丹[1,2]， 罗 敏[1,2]， 孟凡浩[1,2]， 萨楚拉[1,2]， 董金义[1,2]， 刘 铁[3]

（1. 内蒙古师范大学地理科学学院，内蒙古 呼和浩特 010022；2. 内蒙古自治区遥感与地理信息系统重点实验室，内蒙古 呼和浩特 010022；3. 中国科学院新疆生态与地理研究所，新疆 乌鲁木齐 830011）

摘 要： 基于1981—2020年塔里木河流域“四源”5个水文站的日径流数据及格网温度、降水和雪深等数据，采用最大值及POT采样法，分析洪水发生量级、频率和峰现时间等特征，同时采用相关性分析揭示不同洪水指标与影响因素之间的关系并识别关键影响因子。结果表明：(1) 1981—2020年塔里木河“四源”各站点洪峰流量大小依次为：卡群>协和拉>同古孜洛克>沙里桂兰克>大山口，年及季节尺度洪峰流量普遍呈增加趋势，冬季洪峰发生时间均呈提前状态，其中沙里桂兰克年均提前最多为2.61 d，卡群站提前仅0.67 d。(2) 研究时段内塔里木河流域共有2个洪水高发期，为1994—2002年和2006—2011年，流域内大量级洪水集中发生在1990年之后。(3) 洪水发生前不同时间内最小温度、降水和雪深以增加趋势为主；而最大温度以减少趋势为主。春季洪水指标与最大3 d降水的相关性最高，而秋季洪水指标与最大7 d降水的相关性最高。相比于单日降水，多日降水与洪水指标的相关性更高。在雪深相关因子中，最大15 d雪深与各站点的春季洪水指标相关性最高。研究结果对区域水资源管理以及洪水灾害预测提供理论依据。

关 键 词： 洪水；重现期；POT采样；塔里木河“四源”

文章编号： 1000－6060(2024)01－0015－13(0015～0027)

IPCC（Intergovernmental Panel on Climate Change）第六次评估报告指出，气候变暖导致全球和区域水循环加速，极端气候事件频率及强度持续增加[1]。气候变化引起的洪涝灾害给区域经济和人民生命财产安全带来严重威胁[2]。据统计，仅2000—2019年，全球洪涝灾害造成损失高达6510×10^{8} USD，其严重程度、持续时间和频率均有所上升[3]。极端降水和温度导致的冰川积雪加速融化无疑会影响陆地水文过程，改变河流径流补给结构和洪峰特征[4]，增加洪水风险的不确定性，严重威胁人类生命和财产安全。因此，开展气候变化背景下洪水演变规律及关键影响因素研究已迫在眉睫。

已有研究表明，秋冬季降水增加导致欧洲西北部洪水增加，而温度升高、蒸发增加、积雪减少等因素则会导致欧洲东部地区洪水减少[5]。Fang等[6]研究全球洪水发生原因时发现，北美和欧洲洪水时间提前与融雪提前有关，而土壤水分过剩和极端降水共同导致亚马逊、南非、印度和日本等地洪水时间推迟。目前，国内研究主要集中在黄河[7]、淮河[8]以及长江流域[9]，对西北干旱区河流洪水问题关注较少。新疆地处中纬度亚欧大陆腹地，是全球气候变化的敏感地区[10]。新疆河流径流主要来源山区降水和冰川积雪融水，极端水文事件的气象成因更加复杂，洪水的形成和分布具有明显的垂直地带性规律和季节性特点[11]。塔里木河是中国最长的内陆河，受长期断流和生态输水影响，下游已有321 km的河道断流。随着绿洲农业开发，塔里木河流域发生巨大变化，各个水系逐步与干流脱离联系，目前

收稿日期： 2023-07-11； **修订日期：** 2023-09-12

基金项目： 国家自然科学基金（42101030，42361024，42261079）；内蒙古高校青年科技英才（NJYT22027，NJYT23019）；第三次新疆综合科学考察（2021xjkk1400）；内蒙古师范大学研究生科研创新基金（CXJJS22132）；内蒙古师范大学基本科研业务费专项资金（2022JBXC017）资助

作者简介： 邬晓丹（1998-），女，硕士研究生，主要从事极端气候对水资源的影响研究. E-mail: wxd17748555132@163.com

通讯作者： 罗敏（1990-），女，副教授，主要从事流域水文过程模拟、气候变化对水资源影响、遥感应用等研究. E-mail: luomin@imnu.edu.cn

与干流有联系的水系为：阿克苏河、和田河、叶尔羌河，称上游三源流[12]；而开都-孔雀河补给塔里木河下游，并称为"四源"，是塔里木河洪水的主要来源。塔里木河"四源"洪水类型主要包括冰雪消融型洪水、冰川突发性洪水和暴雨洪水，多出现在每年7—8月份。过去50多年塔里木河"四源"各站点年径流量总体增加[13]。黄粤等[14]基于广义极值分布(GEV)对开都河洪水频率特征进行研究，结果表明开都河极端径流近似服从GEV的Frechet分布，且洪水发生频次呈明显增加；顾西辉[15]、Zhang等[16]发现1980年以来塔里木河流域洪水发生的强度、频率增加主要是降水和温度增加所致。通过分析发现，已有研究多针对单一洪水指标，目前仍缺少对塔里木河流域洪水时空变化特征定量分析及其影响因素的深入研究。基于此，本研究以气候变化最为显著的1981—2020年为研究时段，通过分析塔里木河"四源"洪水时空演变特征及其主要影响因素，提出气候变化下塔里木河"四源"洪水风险的适应性对策和建议。本研究有助于揭示冰雪融水补给的高寒山区流域洪水风险对极端气候变化的响应格局及过程，具有重要的科学意义与生产应用价值。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

塔里木河流域位于新疆维吾尔自治区南部，北倚天山、西临帕米尔高原、南靠昆仑山和阿尔金山，流域总面积约102×10⁴ km²，是我国最大的内陆河流域。塔里木河由九大水系共114条河流组成[17]，发育冰川11665条，冰川总面积19877.7 km²，是亚洲水塔重要组成部分，也是最为脆弱的水塔单元之一[18]。塔里木河"四源"冰雪融水是其径流的主要补给源之一，更易受气候变化影响而引发洪水事件[18]。塔里木河"四源"5个水文站，包括阿克苏河沙里桂兰克站(流域面积18400 km²，冰川覆盖742.7 km²)和协和拉站(流域面积12820 km²，冰川覆盖947.01 km²)、和田河同古孜洛克站(流域面积14575 km²，冰川覆盖约2958.31 km²)、叶尔羌河卡群站(流域面积约50248 km²，冰川覆盖约4964.63 km²)以及开都-孔雀河大山口站(所辖流域面积19022 km²，冰川覆盖约为444.53 km²)，位置如图1所示。塔里木河流域降雨稀少、蒸发强烈、气候干燥[17]、昼夜温差大，是典型的大陆性暖温带极端干旱气候。年均温度10.6~11.5 ℃，年平均降水量时空分布差异显著，平原区降水量不足100 mm，而山区降水量超过1000 mm，70%的降水发生在6—10月之间[19]。

1.2 数据来源与处理

塔里木河"四源"5个水文站逐日径流数据来源于新疆塔里木河流域管理局。除阿克苏河流域协和拉和沙里桂兰克水文站(1981—2011年)，其他站点径流数据时间范围均介于1981—2020年。气象指标选用洪水发生前连续1 d、3 d、7 d的最大温度、最小温度和降水数据以及3 d、7 d、15 d的积雪深度数据。其中，降水和温度数据来源于美国国家海洋气象局气候预报中心(CPC)的全球日尺度格网数据集，空间分辨率为0.5°。积雪深度数据来源于美国国家雪冰数据中心(NSIDC)提供空间分辨率为25 km

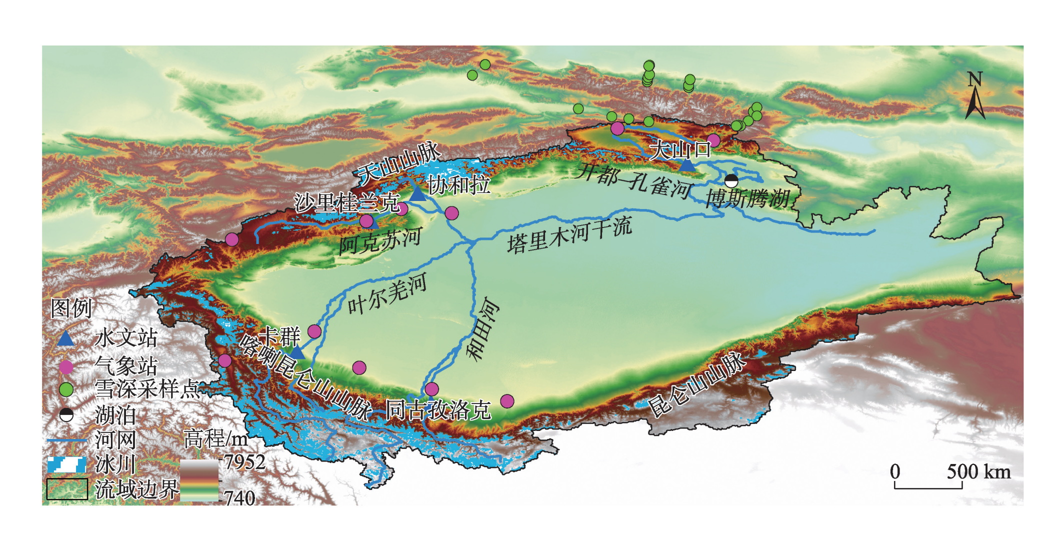


图1 塔里木河流域位置示意图

Fig. 1 Location diagram of Tarim River Basin

的积雪深度数据。为验证格网数据的精度，选取研究区内外11个气象站及27个实测雪深采样点数据进行对比分析(图1)。结果表明，格网最大温度和最小温度与大部分站点具有高相关性且通过显著性检验。降水相关性稍低但仍大于0.60。实测雪深数据与格网雪深数据相关性达到0.64(图2)。

1.3 研究方法

1.3.1 洪水指标提取 本研究选取9种洪水指标(表1)，采用最大值(AM)及POT采样方法描述洪水量级、频率和峰现时间特征[20]。AM采样仅选择年/季节中最大场洪水，会忽略其他大洪水信息[15]；对于一年中没有洪水的干旱年份，选取年最大流量则会影响研究结果的代表性。POT采样通过计算所有超阈值洪水，而不管其发生时间，能最大限度的克服AM采样具有的缺陷。因此，本研究同时采用POT采样，对AM法进行补充，以增加洪水样本的代表性。此方法在塔里木河流域得到广泛应用[15]，故采样选择美国水资源协会(USWRC)提出的判别标准，对洪峰独立性进行判别[21]。

$$\begin{cases} D > 5 + \log(A) \\ Q_{\min} < \dfrac{3}{4}\min(Q_1,\ Q_2) \end{cases} \tag{1}$$

式中：D为2个连续洪峰之间的间隔时间(d)；A为流域面积(km^2)；$Q_{\min}$为洪峰量级的最小值；Q_1和Q_2分别为连续2个洪峰的量级($m^3 \cdot s^{-1}$)。

1.3.2 重现期估算 重现期是一定年代记录资料统计期间内，大于或等于某量级的水文要素出现一次的平均间隔时间[8]，是概率意义上的“徊转周期”，本质是概率分布右侧的小概率问题。本文采用极值I型分布法求重现期，极值I型分布函数为：

$$F(x) = P(X_{\max} < x) = e^{-e^{-a(x-u)}} \tag{2}$$

其超过保证率函数，即Gumbel概率分布函数是：

$$p(x) = 1 - e^{-e^{-a(x-u)}} \tag{3}$$

式中：$F(x)$为极大值的分布函数；$P(X_{\max} < x)$为概率分布表达式[22]；$X_{\max}$为水文要素的最大值；x为要分析的水文要素(例如洪水流量)；a和u为极大值

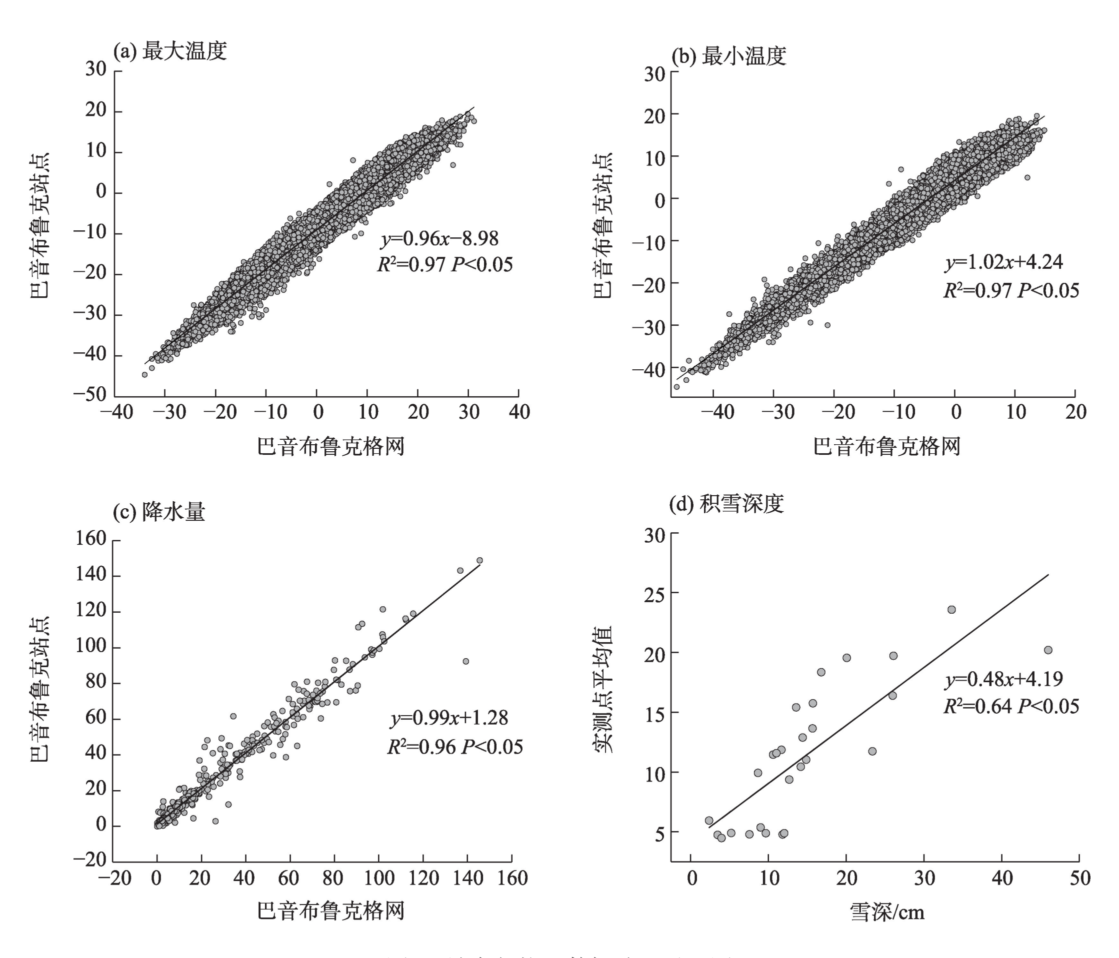


图2 站点与格网数据验证对比图

Fig. 2 Comparison diagram of site and grid data verification

表1 采用的9种洪水指标

Tab. 1 Nine flood indicators used in the study

洪水指标定义	简称	单位
年最大1 d流量	AMF	$m^3 \cdot s^{-1}$
年最大1 d流量发生日期	AMFD	d
春季(3—5月)最大1 d流量	AMFSp	$m^3 \cdot s^{-1}$
夏季(6—8月)最大1 d流量	AMFSu	$m^3 \cdot s^{-1}$
秋季(9—11月)最大1 d流量	AMFAu	$m^3 \cdot s^{-1}$
冬季(12月—次年2月)最大1 d流量	AMFWi	$m^3 \cdot s^{-1}$
POT超过阈值洪峰流量	POT3M	$m^3 \cdot s^{-1}$
每年POT样本数量	POT3F	次
每年POT洪水发生平均日期	MDF	d

注:POT为峰值过量流量。

分布参数,计算公式为:

$$a = \frac{\sigma_y}{\sigma_x} \tag{4}$$

$$u = \bar{x} - \frac{\sigma_y}{\sigma_x}\bar{y} \tag{5}$$

式中: $\bar{x}$ 和 $\bar{y}$ 为样本均值; σ_x 和 σ_y 为样本的标准差。

极值重现期的计算中, p 为概率,即重现期的倒数; X_p 为对应于概率 p 的水文要素值。可用下式估算:

$$X_p = u - \frac{1}{a}\ln\left[-\ln(1-p)\right] \tag{6}$$

1.3.3 趋势分析法 采用线性趋势法计算各洪水指标的变化趋势[23],公式如下:

$$\mathrm{Slope} = \frac{n \times \sum_{i=1}^{n}(i \times T_i) - \sum_{i=1}^{n} i \sum_{i=1}^{n} T_i}{n\sum_{i=1}^{n} i^2 - \left(\sum_{i=1}^{n} i\right)^2} \tag{7}$$

式中:Slope为线性回归方程的斜率; n 为时间序列的长度; i 为年序号($1 \leqslant i \leqslant n$); T_i 为第 i 年极端洪水值,若斜率为正则表示该值呈增加趋势,反之则表示呈下降趋势。

1.3.4 Pearson 相关分析 Pearson相关分析常用于揭示地理要素之间相互关系的密切程度[24]。本研究采用Pearson相关分析计算洪水指标与区域气候变化的关系。二者的相关系数表示为:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left[(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})\right]}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2}} \tag{8}$$

式中: r 为 x 和 y 的相关系数; n 为样本量; x_i 和 y_i 分别为第 i 年的洪水指标值或气候要素值; $\bar{x}$ 和 $\bar{y}$ 分别为 x 和 y 的均值。r 的取值为[−1, 1], $|r|$ 越大表示两变量相关性越强。

2 结果与分析

2.1 洪水时空分布特征

塔里木河“四源”各站点均以夏季洪峰流量最高且与年最大洪峰流量一致,冬季洪峰流量最低(表2)。夏季卡群站洪峰流量最高,AMFSu为1423.10 $m^3 \cdot s^{-1}$,其次为协和拉站(1326.45 $m^3 \cdot s^{-1}$)。冬季大山口站洪峰流量最高,AMFWi为89.79 $m^3 \cdot s^{-1}$,协和拉站和卡群站次之,分别为77.87 $m^3 \cdot s^{-1}$ 和70.46 $m^3 \cdot s^{-1}$。除沙里桂兰克和大山口站外,其他3站秋季洪峰流量均大于春季。在年最大洪水发生日期上,沙里桂兰克站的AMFD为180.48 d,其次是同古孜洛克站(188.25 d)。协和拉站的AMFD为214.00 d,大山口站为214.18 d,比协和拉站略高,而卡群站的AMFD为217.08 d,在所有站中洪水发生时期最晚。此外,分析POT洪水发生平均日期中,沙里桂兰克站MDF为180.24 d,略低于年最大洪水发生日期。协和拉和大山口站的MDF分别为212.91 d和195.70 d,明显低于其年最大洪水发生日期。同古孜洛克站的MDF为211.31 d,而卡群站为215.20 d。POT样本数量中以大山口站点最高,年均POT3F为7.5次,其次为卡群站(5.72次)。除协和拉站外,其他站点POT洪峰流量均高于年最大洪峰流

表2 各洪水指标多年均值

Tab. 2 Multi-year mean values of each flood indicator

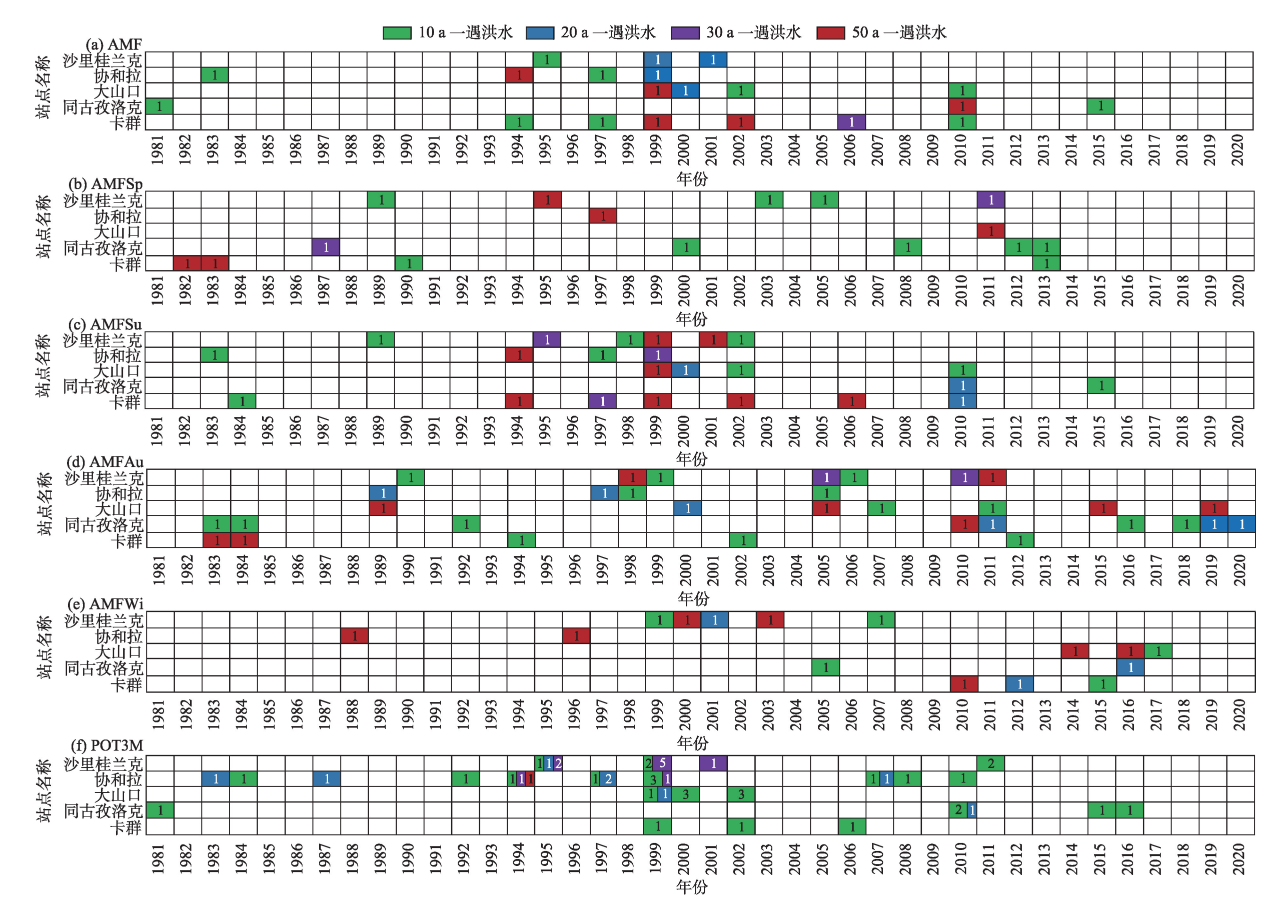
站点名称	AMFSp /$m^3 \cdot s^{-1}$	AMFSu /$m^3 \cdot s^{-1}$	AMFAu /$m^3 \cdot s^{-1}$	AMFWi /$m^3 \cdot s^{-1}$	AMF /$m^3 \cdot s^{-1}$	AMFD /d	POT3M /$m^3 \cdot s^{-1}$	POT3F /次	MDF /d
沙里桂兰克	375.19	537.52	209.76	31.22	568.65	180.48	608.38	4.89	180.24
协和拉	240.17	1326.45	399.03	77.87	1326.45	214.00	1157.89	3.33	212.91
大山口	236.90	390.65	195.75	89.79	399.35	214.18	459.23	7.50	195.70
同古孜洛克	71.08	637.13	192.77	14.02	637.13	188.25	677.50	4.60	211.31
卡群	159.88	1423.10	580.18	70.46	1423.10	217.08	1505.56	5.72	215.20

量，该结果说明AM法可能会高估这些站点洪水发生频次。通过对比各站点的超阈值洪峰流量和年最大洪峰流量，发现卡群>协和拉>同古孜洛克>沙里桂兰克>大山口，说明叶尔羌河洪峰流量在四源中最高，开都-孔雀河最低。

2.2 洪水发生重现期与频率

图3为各站点不同重现期洪水发生时间分布情况。结果表明，1981—2020年，不同站点10 a一遇POT3M在1994—2002年最为集中(32次)，仅1999年5个水文站就发生10 a一遇以上洪水14次，说明这一时期是洪水高发期。从不同流域来看，阿克苏河在这时期洪水发生最多(沙里桂兰克站12次，协和拉站10次)，主要集中在1994、1995、1997年和1999年。其中，1994年在协和拉站发生了50 a一遇洪水。其次为开都-孔雀河大山口站，在1994—2002年共发生10 a一遇以上洪水8次，分别集中在1999、2000年和2002年。叶尔羌河卡群站则在1999年和2002年各发生10 a一遇洪水1次，而和田河同古孜洛克站这一时期无10 a一遇以上洪水发生。另一洪水高发期为2006—2011年，共计发生10 a一遇以上洪水10次，主要集中在阿克苏河(沙里桂兰克站2次，协和拉站4次)及和田河(3次)。值得指出的是，基于AM法提取不同站点10 a一遇以上AMF洪水频次较POT法更低，但提取的50 a一遇洪水频率更高(图4)。

基于AM法进一步提取不同季节10 a一遇以上洪水事件分布情况。不难看出，1981—2020年，夏季10 a一遇以上洪水事件发生时间较为集中，且高发期同样介于1994—2002年(15次)。除同古孜洛克站外，其余站点1999年均发生30 a一遇洪水事件。其他季节10 a一遇以上洪水事件发生时间较为分散。冬春季10 a一遇以上洪水发生次数最少。春季卡群站发生50 a一遇洪水共2次，其余站点发生50 a一遇洪水1次或未发生。而冬季洪水主要发生



注：AMF为年最大1 d流量；AMFSp为春季最大1 d流量；AMFSu为夏季最大1 d流量；AMFAu为秋季最大1 d流量；AMFWi为冬季最大1 d流量；POT3M为POT超过阈值洪峰流量。色块上数值表示洪水发生次数。下同。

图3　各水文站洪水指标重现期时间分布

Fig. 3　Time distribution of flood index recurrence period at each hydrological station

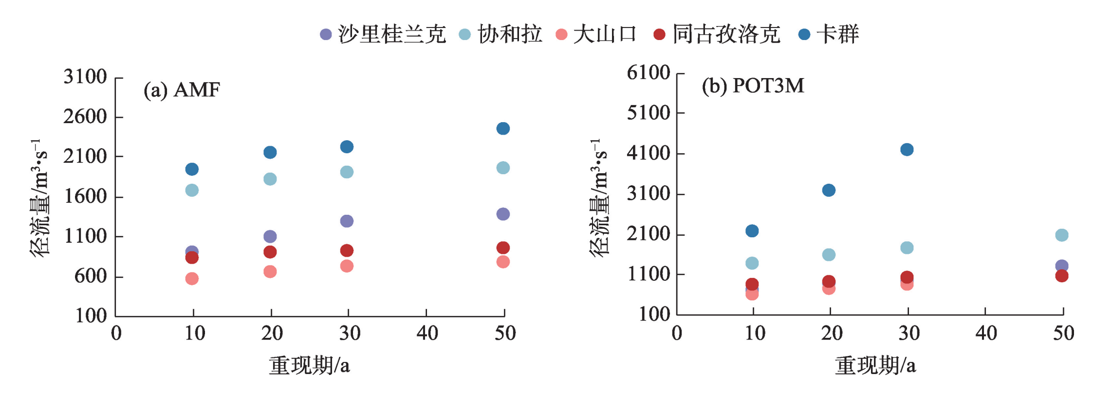


图4 不同重现期洪峰流量

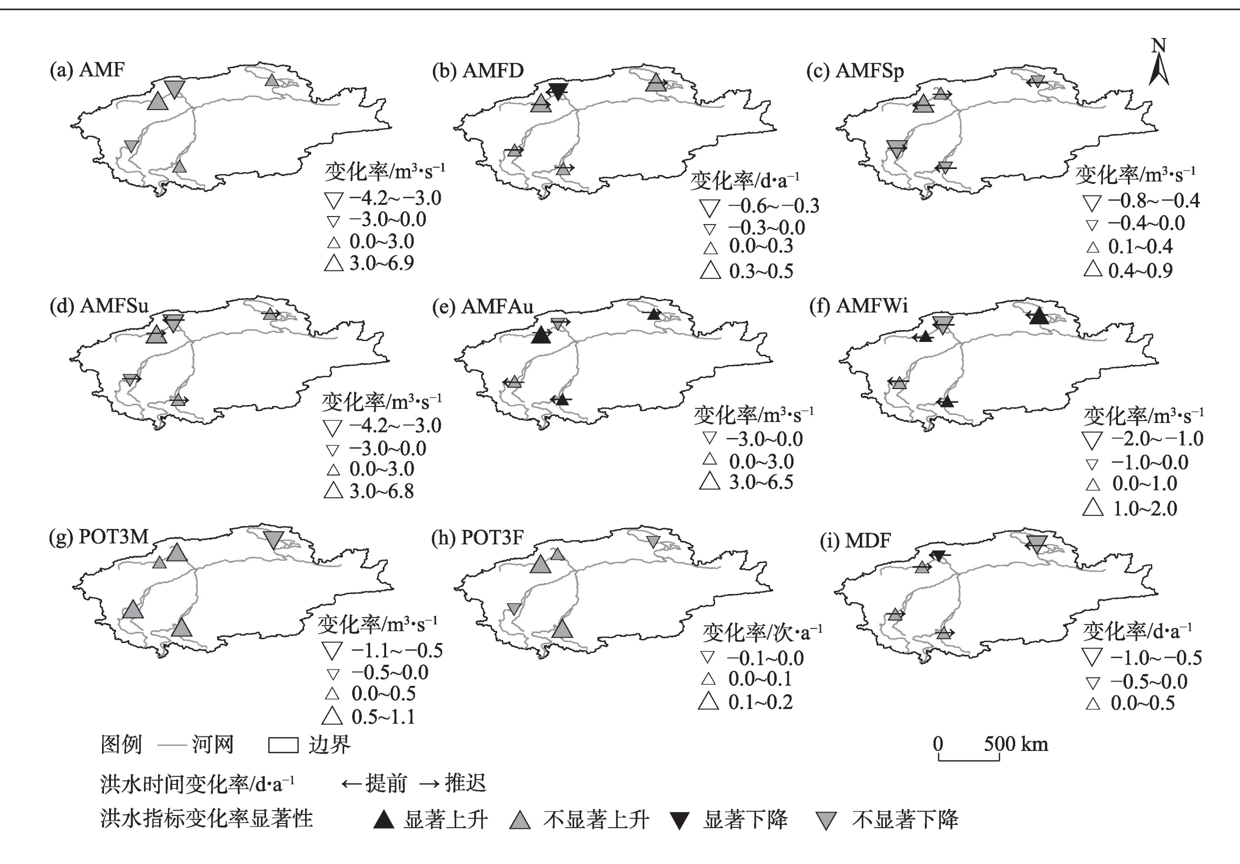
Fig. 4 Peak discharge in different return period

在1999年之后。冬季协和拉站在1981—2011年共发生50 a一遇洪水2次(1988年和1996年),探究其原因,可能是由于1988年冬季温度普遍较高且在12月初北疆及天山中部附近降雪增多,而1996年发生历史上罕见大洪水事件导致暴雨或降水频发[25],随着温度变暖大量高山积雪消融,导致冬季洪水量级增大。秋季为各季节中洪水发生次数最多的季节,且在2005年之后10 a一遇以上洪水事件发生次数较之前有所增加。秋季大山口站发生50 a一遇洪水共4次,其余站点发生50 a一遇洪水2次或未发生。各水文站洪水指标均表现为时间上容易集中在某一时期,例如集中在1994—2002年和2006—2011年,并且在某一年份,多个水文站易同时发生洪水,说明流域内洪水在时间和空间上都有可能以集群的方式发生。

2.3 洪水指标变化特征

图5显示了9个洪水指标的时间变化特征。不难看出,不同站点AMF变化趋势均不显著。协和拉和卡群站AMF最大,但呈下降趋势,年均下降速率分别为−4.25 $m^3 \cdot s^{-1}$和−2.38 $m^3 \cdot s^{-1}$;沙里桂兰克、大山口和同古孜洛克站AMF呈上升趋势,年均上升速率分别为6.95 $m^3 \cdot s^{-1}$、2.54 $m^3 \cdot s^{-1}$和2.98 $m^3 \cdot s^{-1}$。就AMFD而言,协和拉站呈显著提前趋势,年均提前0.60 d。其余站点AMFD均表现为推迟趋势。春季温度升高导致冰川积雪融水增加,会显著改变春季洪水量级及发生时间。阿克苏河流域的沙里桂兰克和协和拉站AMFSp均呈上升趋势,但洪水发生时间分别呈提前和推后趋势;其余站点春季洪峰流量均呈下降趋势且仅卡群站洪水发生时间推迟。塔里木河夏季温度高且降水量大,AMFSu与AMF具有相同的趋势,不再单独分析。除协和拉站外,其他站点AMFAu均呈上升趋势,且沙里桂兰克、大山口和同古孜洛克站上升趋势显著($P<0.05$)。就发生时间而言,卡群和同古孜洛克站秋季洪水发生时间呈提前趋势,其余站点则呈推迟趋势。由于复杂的地理条件,塔里木河冬季易发生冰川诱发型洪水。不难看出,除协和拉站外,其余站点AMFWi均呈上升趋势,其中沙里桂兰克、大山口和同古孜洛克站上升趋势显著,表明这些流域冬季洪水量增加明显。由于协和拉站上游有大型水库,蓄水作用减少了下游流量以及附近耕地面积灌溉密集导致冬季协和拉站洪水呈不显著下降趋势[16]。冬季洪水发生时间均呈提前趋势,沙里桂兰克、同古孜洛克、协和拉、大山口站和卡群站分别年均提前2.61 d、1.57 d、1.31 d、1.20 d和0.67 d。

对于POT采样洪水,除大山口站外,其余站点POT3M均呈不显著上升趋势,沙里桂兰克、协和拉、同古孜洛克和卡群站上升速率分别为0.48 $m^3 \cdot s^{-1}$、0.51 $m^3 \cdot s^{-1}$、1.14 $m^3 \cdot s^{-1}$和1.02 $m^3 \cdot s^{-1}$;大山口站以−1.14 $m^3 \cdot s^{-1}$的速率呈不显著下降趋势。该结果说明除开都-孔雀河流域,塔里木河其他源流POT检测洪水量级均增加。就发生次数而言,沙里桂兰克、协和拉以及同古孜洛克站POT3F呈不显著上升趋势,分别年均上升0.13次、0.01次和0.10次,说明阿克苏河与和田河流域POT检测洪水频次增加。而大山口和卡群站POT3F呈不显著下降趋势,分别年均下降0.09次和0.01次。除开都-孔雀河大山口站外,其他站点MDF变化趋势与AMFD一致,即协和拉站洪水发生时间提前,沙里桂兰克、卡群及同古孜洛克站洪水发生时间推迟。而大山口站MDF



注：AMFD为年最大1 d流量发生日期；POT3F为每年POT样本数量；MDF为每年POT洪水发生平均日期。下同。

图5　各洪水指标时间变化趋势

Fig. 5　Time variation trend of each flood index in the Tarim River Basin

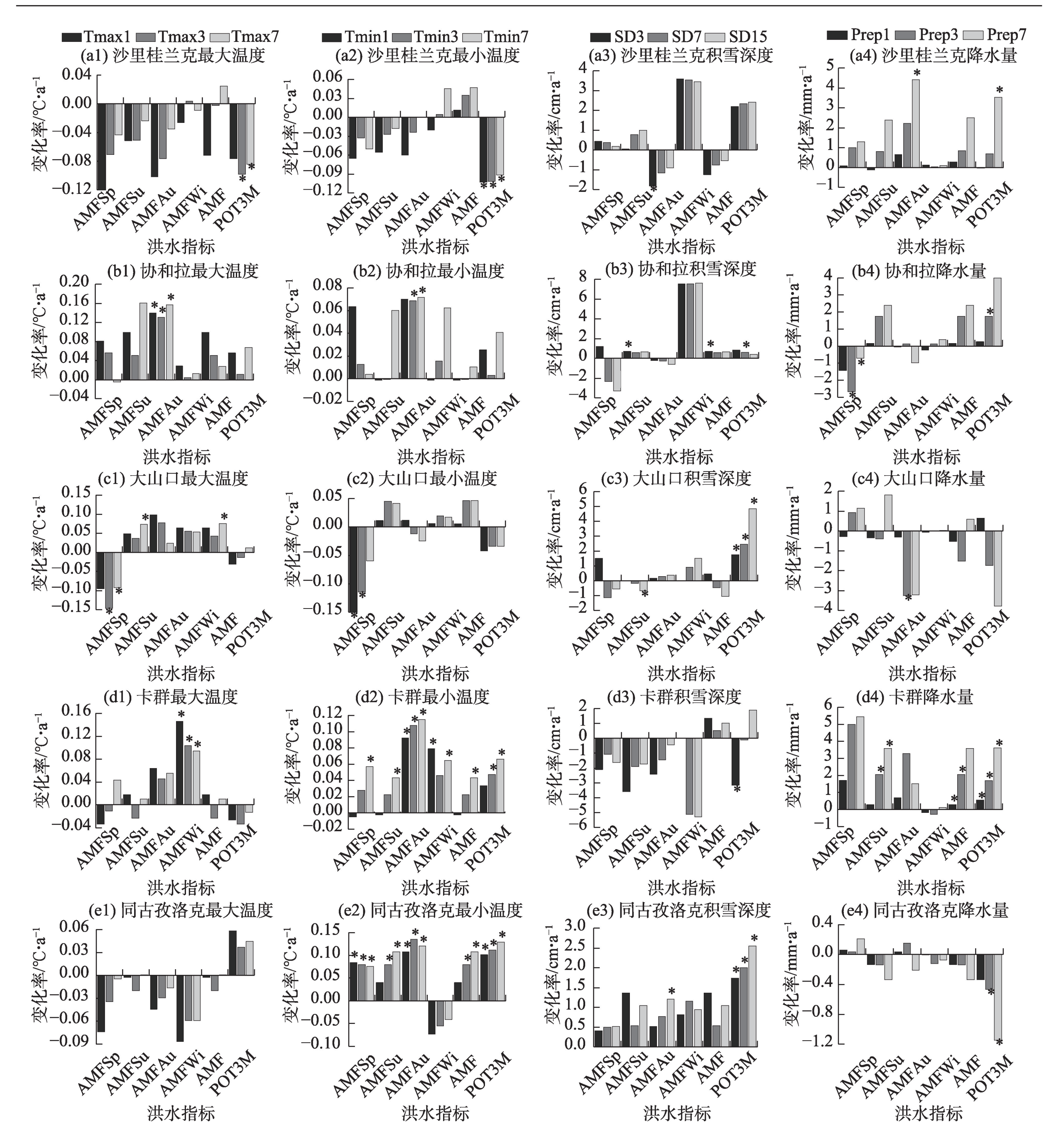
呈现提前趋势。

2.4 影响洪水发生因素变化趋势

图6为洪水发生前不同时间最大温度、最小温度、雪深和降水时间变化趋势图。不难看出，阿克苏流域沙里桂兰克站洪水发生前不同时间内最大温度和最小温度均以减少趋势为主，而协和拉站则以增加趋势为主。大山口站春季和POT洪水发生前不同时间内的最大温度和最小温度减少，而其他季节均以增加趋势为主；就POT洪水而言，仅洪水发生前Tmax7呈增加趋势。卡群站不同洪水发生前最小温度主要以增加趋势为主，而春季及POT洪水发生前最大温度主要表现为减少趋势。同古孜洛克站仅POT洪水发生前不同时间尺度内最大温度增加，而不同尺度最小温度减少趋势仅出现在冬季洪水发生前。

阿克苏河流域洪水发生前不同时间内雪深以增加趋势为主，仅秋季洪水发生前雪深表现为减少趋势；冬季洪水发生前沙里桂兰克与协和拉站雪深变化率最高。大山口站POT洪水发生前不同时间内雪深呈显著增加趋势。卡群站不同洪水发生前雪深均以减少趋势为主，仅年最大洪水发生前雪深呈上升趋势，其中SD3变化率最高。同古孜洛克站洪水发生前雪深均呈增加趋势。

沙里桂兰克站洪水发生前不同时间内降水均以增加趋势为主；而协和拉站不同时间内春季降水呈下降趋势，其余季节以增加趋势为主。大山口站秋季和POT洪水发生前不同时间内降水呈下降趋势。卡群站不同时间内降水以增加趋势为主。同古孜洛克站夏季、冬季、年以及POT洪水发生前不同时间降水均呈下降趋势。综上所述，塔里木河流域洪水发生前不同时间内最小温度、降水以及雪深多以增加趋势为主，而最大温度以减少趋势为主。近40 a时间变化中洪水发生前SD15变化率最大，雪深在阿克苏河、和田河和开都-孔雀河大部分指标均呈上升趋势，其中协和拉站上升速率最高达到7.61 cm·a^{-1}。降水在阿克苏河和叶尔羌河均以增加趋势为主，最高增速为5.44 mm·a^{-1}，而在和田河以下降趋势为主，其中以POT系列降水变化率最大，下降速率最高为−1.15 mm·a^{-1}；总体上塔里木河流域洪水发生前Prep7变化率最大。



注：Tmax1、Tmax3和Tmax7分别为洪水发生前1 d、3 d和7 d的最大温度；Tmin1、Tmin3和Tmin7分别为洪水发生前1 d、3 d和7 d的最小温度；SD3、SD7和SD15分别为洪水发生前1 d、3 d和15 d的积雪深度；Prep1、Prep3和Prep7分别为洪水发生前1 d、3 d和7 d的降水量。*表示变化趋势通过95%显著性检验。下同。

图6 洪水发生前不同时间内的最大温度、最小温度、雪深和降水量变化趋势

Fig. 6 Variation trends of maximum temperature, minimum temperature, snow depth, and precipitation at different times before the flood occurred

2.5 洪水指标与其影响因素关系

如图7所示，塔里木河流域中各站点POT洪水指标与洪水发生前不同时间内降水量、最小温度呈正相关关系，其中Prep3与沙里桂兰克和大山口站相关性最高，分别为0.29和0.37；而各站点POT洪水指标与最大温度和雪深呈负相关关系，仅同古孜洛克站与SD7和SD15呈正相关关系，相关性分别为0.15和0.23。对于AM法提取洪水，各站年和夏季洪

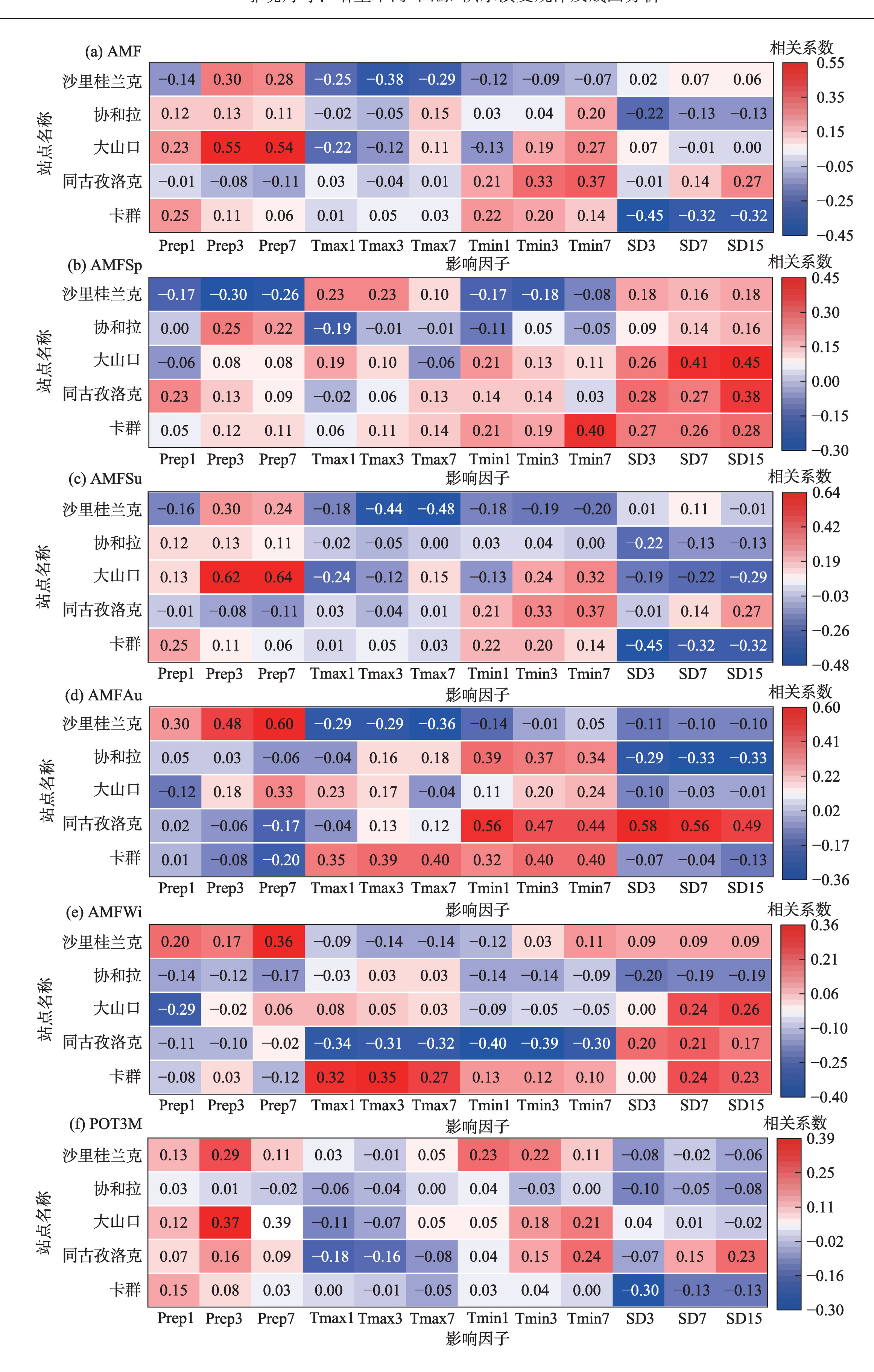


图7 塔里木河流域各水文站洪水指标与影响因素的相关性

Fig. 7 Correlation between flood indicators and influencing factors at different hydrological stations in the Tarim River Basin

水指标与降水量、最大温度、最小温度以及雪深之间相关性较一致。同古孜洛克站洪水指标与降水呈负相关关系,其余站点洪水指标与降水之间均呈正相关关系,以大山口站年和夏季洪水指标与Prep3、Prep7相关性最高,均高于0.50,表明降水的增加直接影响年和夏季最大洪峰流量。阿克苏河沙里桂兰克站年和夏季洪水指标与最大温度、最小温度均呈负相关关系,其中与最大3 d以上最大温度相关性最高,相关系数为-0.48,协和拉站中洪水指标与最大温度呈负相关关系,与最小温度呈正相关关系。卡群站年和夏季洪水指标与雪深之间负相关关系最高,其中与SD3相关性高达-0.45。

阿克苏河沙里桂兰克站春季洪水指标与降水、最小温度呈负相关关系,以最大3 d降水的相关性最高(-0.30);最大温度、雪深与沙里桂兰克站春季洪水指标呈正相关关系。而协和拉站中春季洪水指标与最大温度、最小温度呈负相关关系外,与降水、雪深呈正相关关系。其余3个站点(大山口站、同古孜洛克站、卡群站)春季洪水指标均与洪水发生前降水、最大温度、最小温度和雪深之间呈正相关关系,其中各站点与雪深相关性较高。各站点间秋冬季洪水指标与降水之间相关性相似,除沙里桂兰克站洪水指标与降水呈正相关关系外,其余站点洪水指标均与降水呈负相关关系。秋季洪水指标中沙里桂兰克站与最大温度、最小温度均呈负相关关系,而卡群站与最大温度、最小温度呈正相关关系。最小温度和雪深是影响同古孜洛克站秋季洪水指标的重要因素之一,其中以单日最小温度(Tmin1)和3 d雪深(SD3)与其相关性最高,分别为0.56和0.58。同古孜洛克和卡群站冬季洪水指标与最大温度、最小温度相关性较高,其中同古孜洛克站冬季洪水指标与最大温度、最小温度呈负相关关系,卡群站与其呈正相关关系;其余站点与之相关性较小。秋季洪水指标中仅同古孜洛克站与雪深之间呈正相关关系,而冬季洪水指标中仅协和拉站与雪深呈负相关关系。

总体来说,降水、最大温度、最小温度和雪深是洪水形成过程中重要的环境影响因子,受形成条件影响,各影响因素在不同流域上的关系也不尽相同。卡群站年和各季节洪水指标与最大温度、最小温度均呈正相关关系;降水的3个因子中,最大3 d降水(Prep3)与各站点春季洪水指标相关性最高,最大7 d降水(Prep7)与各站点秋季洪水指标最相关。此外,在雪深相关因子中,最大15 d雪深(SD15)与各站点的春季洪水指标相关性最高。相比于单日降水,多日降水与洪水指标相关性更高,能够解释多数流域极端洪水事件的发生。

3 讨论

近40 a来新疆塔里木河流域温度和降水均呈增加趋势[26],气候从“暖干”向“暖湿”转变[27]。洪水发生主要受温度、降水及山区冰川积雪融水等影响,温度升高促进冰川积雪融化,降水增加进一步导致河流流量和洪峰呈增加趋势[28]。塔里木河“四源”中,阿克苏河流域发源于天山中段西部南麓地区,近40 a来,阿克苏河流域温度升温速率为0.34~0.38 ℃·a^{-1},显著高于中国西北和中亚地区[29]。开都-孔雀河位于天山南侧,积雪面积最深可达30 cm以上[26]。阿克苏河沙里桂兰克站和开都-孔雀河大山口站夏季洪峰流量呈增加趋势,流域内夏季洪峰流量主要由降水决定,其与降水呈正相关同时与最大温度呈负相关,可能是在较大的山区内降水发生的同时往往伴随着降温过程[30]。阿克苏河和开都-孔雀河春季洪峰流量与不同时间内雪深均呈正相关关系,阿克苏河春季洪峰流量因温度升高加剧积雪融化,从而增加春季洪水流量。与此同时,和田河和叶尔羌河从昆仑山北坡汇入塔里木河,积雪深度一般在10 cm以下,但流域内冰川资源丰富[26],随着温度升高,冰川融水成为引发洪水的主要因素。近年来叶尔羌河流域春夏季最大温度不断下降,冬季降水不断增加[31],卡群站春夏季洪峰流量呈下降趋势,而秋冬季洪峰流量呈上升且提前发生趋势。冬春季洪峰流量与洪水发生前不同时间内温度、雪深呈正相关关系,说明冬季积雪大、温度回升,极易在冬春两季形成洪水。而秋季的最大降雨量往往会被储存起来,随着土壤湿度和地下水位不断增加,在冬季达到最大值,因此冬季降水增多会导致冬季洪水发生时间提前。对和田河而言,洪水主要由冰川融水和季节积雪融水形成,同古孜洛克站年、夏季、秋冬季和POT洪水呈增加趋势,1980年来洪水发生前不同时间内雪深均呈增加趋势,与秋冬季洪水呈正相关关系,因此秋冬季洪峰流量呈显著增加趋势与温度升高导致积雪融化有着密切关系。

塔里木河“四源”年和夏季洪峰流量发生时间均呈推迟趋势，仅协和拉站年最大流量呈减少且提前发生趋势。周京武等[32]也发现随着降水和温度增加，天山南坡河流径流量也增加，年最大径流量出现时间从6月推迟到7月。近年来温度升高导致冰川融化加速，麦茨巴赫冰川湖盆蓄水期缩短有关[33]，从而导致协和拉站峰现时间提前。各站点冬季洪峰流量发生时间均呈提前发生趋势，这与Zhang等[16]研究结果一致。除开都-孔雀河大山口站外，其他站点POT洪水发生时间变化趋势与AMFD一致，即协和拉站洪水发生时间提前，沙里桂兰克、卡群及同古孜洛克站洪水发生时间推迟；而大山口站MDF呈提前趋势，和AMFD呈相反结果，这一结果与顾西辉等[15]研究相符。

从洪水时空分布来看，塔里木河流域的洪水可能呈现时空集群形式发生。1990年后，塔里木河流域内洪水频繁且发生次数逐渐增多。研究结果发现1999年流域内所有站点均发生大量级洪水，覆盖天山南北坡、南疆西部山区和昆仑山北坡。这些洪水主要由融雪和暴雨叠加形成的混合型洪水，范围广、历时长、量级大。全疆有37条河流出现危险流量，包括阿克苏河和开都-孔雀河等25条河流创下历史最高水位[34]。何慧[35]研究发现，1999年冬春季积雪广泛且高空温度骤降，与西太平洋副热带高压向西延伸导致再次升温，加之山区降水持续时间长且量大，共同引发了1999年该区域爆发集中型洪水。

此外，在干旱半干旱区高寒山区，洪水受到诸如高层大气温度、冰川湖的潜在洪水风险以及人类活动等多重因素影响。这些因素根据地理和气候条件有所不同，给洪水预测带来复杂性。因此，未来研究可重点关注洪水形成机制，并利用未来变化情景数据预测洪水变化情况。

4　结　论

（1）不同季节各站点洪水指标均以夏季洪峰流量最高且与年最大洪峰流量一致；根据POT和AM采样结果，各站点洪峰流量依次排序为：卡群>协和拉>同古孜洛克>沙里桂兰克>大山口。卡群站洪水发生日期最晚，其次为大山口站。

（2）研究时段内有2个洪水高发期，分别为1994—2002年和2006—2011年，这2个时期内阿克苏河流域洪水发生频率最高。夏季洪水高发期介于1994—2002年，其余3个季节洪水事件发生较分散。

（3）塔里木河“四源”各站点AM和POT3M洪峰流量变化趋势均不显著；和田河和叶尔羌河流域AMF和POT3M流量呈增加趋势且洪水发生时间推迟，阿克苏河流域协和拉站AMF和POT3M流量呈减少并且发生时间提前，年均提前0.60 d。各站点冬季最大洪峰流量发生时间均呈提前趋势。和田河和阿克苏河流域POT洪水发生次数呈增加趋势。

（4）洪水发生前塔里木河“四源”不同时间内最小温度、降水和雪深主要呈增加趋势，而最大温度主要呈减少趋势。温度对叶尔羌河流域洪水发生的影响较大，而阿克苏河流域洪水则以降水影响为主。相比于洪水发生前单日降水，最大3 d以上降水与洪水指标的相关性更高。洪水发生前不同时间内雪深对冬春季洪水影响较大；而夏秋季洪水指标受最小温度影响较大。

参考文献（References）

[1] IPCC. Climate change 2022: Impacts, adaptation, and vulnerability [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.

[2] Hirabayashi Y, Mahendran R, Koirala S, et al. Global flood risk under climate change[J]. Nature Climate Change, 2013, 3(9): 816-821.

[3] Devitt L, Neal J, Coxon G, et al. Flood hazard potential reveals global floodplain settlement patterns[J]. Nature Communications, 2023, 14(1): 2801, doi: 10.1038/s41467-023-38297-9.

[4] 陈亚宁, 李稚, 方功焕, 等. 气候变化对中亚天山山区水资源影响研究[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 18-26. [Chen Yaning, Li Zhi, Fang Gonghuan, et al. Impact of climate change on water resources in the Tianshan Mountains, Central Asia[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 18-26.]

[5] Blöschl G, Hall J, Viglione A, et al. Changing climate both increases and decreases European river floods[J]. Nature, 2019, 573 (7772): 108-111.

[6] Fang G H, Yang J, Li Z, et al. Shifting in the global flood timing[J]. Scientific Reports, 2022, 12(1): 18853, doi: 10.1038/s41598-022-23748-y.

[7] 杨涛, 陆桂华, 李会会, 等. 气候变化下水文极端事件变化预测研究进展[J]. 水科学进展, 2011, 22(2): 279-286. [Yang Tao, Lu Guihua, Li Huihui, et al. Advances in the study of projection of climate change impacts on hydrological extremes[J]. Advances in Water Science, 2011, 22(2): 279-286.]

[8] 杜鸿, 夏军, 曾思栋, 等. 淮河流域极端径流的时空变化规律及统计模拟[J]. 地理学报, 2012, 67(3): 398-409. [Du Hong, Xia Jun, Zeng Sidong, et al. Temporal and spatial variations and statistical models of extreme runoff in Huaihe River Basin[J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(3): 398-409.]

[9] Yi Y, Liu S Y, Zhang X H, et al. Spring floods and their major influential factors in the upper reaches of Jinsha River Basin during 2001—2020[J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2023, 45: 101318, doi: 10.1016/j.ejrh.2023.101318.

[10] 陈亚宁, 杨青, 罗毅, 等. 西北干旱区水资源问题研究思考[J]. 干旱区地理, 2012, 35(1): 1-9. [Chen Yaning, Yang Qing, Luo Yi, et al. Ponder on the issues of water resources in the arid region of northwest China[J]. Arid Land Geography, 2012, 35(1): 1-9.]

[11] 王学良, 陈仁升, 刘俊峰, 等. 1956—2021年疏勒河上游山区洪水变化特征研究[J]. 干旱区地理, 2023, 46(8): 1260-1268. [Wang Xueliang, Chen Rensheng, Liu Junfeng, et al. Study on the characteristics of flood changes in mountainous areas of upper Shule River from 1956 to 2021[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(8): 1260-1268.]

[12] 傅丽昕, 陈亚宁, 李卫红, 等. 塔里木河三源流区气候变化对径流量的影响[J]. 干旱区地理, 2008, 31(2): 237-242. [Fu Lixin, Chen Yaning, Li Weihong, et al. Influence of climatic change on runoff and water resources in the headwaters of the Tarim River[J]. Arid Land Geography, 2008, 31(2): 237-242.]

[13] 王远见, 董其华, 周海鹰. 塔里木河干流上游洪水演进规律分析与数值模拟[J]. 干旱区地理, 2018, 41(6): 1143-1150. [Wang Yuanjian, Dong Qihua, Zhou Haiying. Analysis and numerical simulation of flood routing of upper reaches of the mainstream of Tarim River[J]. Arid Land Geography, 2018, 41(6): 1143-1150.]

[14] 黄粤, 陈曦, 刘铁, 等. 基于GEV分布的天山开都河洪水频率特征分析[J]. 气候变化研究进展, 2016, 12(1): 37-44. [Huang Yue, Chen Xi, Liu Tie, et al. Flood frequency analysis for Kaidu Watershed in Tianshan Mountains[J]. Climate Change Research, 2016, 12(1): 37-44.]

[15] 顾西辉, 张强, 孙鹏, 等. 新疆塔河流域洪水量级、频率及峰现时间变化特征、成因及影响[J]. 地理学报, 2015, 70(9): 1390-1401. [Gu Xihui, Zhang Qiang, Sun Peng, et al. Magnitude, frequency and timing of floods in the Tarim River, Xinjiang: Characteristics, causes and impacts[J]. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(9): 1390-1401.]

[16] Zhang Q, Gu X H, Singh V P, et al. Magnitude, frequency and timing of floods in the Tarim River Basin, China: Changes, causes and implications[J]. Global and Planetary Change, 2016, 139: 44-55.

[17] 刘时银, 丁永建, 张勇, 等. 塔里木河流域冰川变化及其对水资源影响[J]. 地理学报, 2006, 61(5): 482-490. [Liu Shiyin, Ding Yongjian, Zhang Yong, et al. Impact of the glacial change on water resources in the Tarim River Basin[J]. Acta Geographica Sinica, 2006, 61(5): 482-490.]

[18] 邓海军, 陈亚宁. 中亚天山山区冰雪变化及其对区域水资源的影响[J]. 地理学报, 2018, 73(7): 1309-1323. [Deng Haijun, Chen Yaning. The glacier and snow variations and their impact on water resources in mountain regions: A case study in Tianshan Mountains of Central Asia[J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(7): 1309-1323.]

[19] Fang G H, Yang J, Chen Y N, et al. How hydrologic processes differ spatially in a large basin: Multisite and multiobjective modeling in the Tarim River Basin[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2018, 123(14): 7098-7113.

[20] Mediero L, Santillán D, Garrote L, et al. Detection and attribution of trends in magnitude, frequency and timing of floods in Spain[J]. Journal of Hydrology, 2014, 517: 1072-1088.

[21] Lang M, Ouarda T B M J, Bobée B. Towards operational guidelines for over-threshold modeling[J]. Journal of Hydrology, 1999, 225(3-4): 103-117.

[22] 王俊超, 彭涛, 王清. 乌江流域极端降水时空分布特征及重现期分析[J]. 暴雨灾害, 2019, 38(3): 267-275. [Wang Junchao, Peng Tao, Wang Qing. Spatial and temporal distributions of extreme precipitation in the Wujiang River Valley and reproducibility analysis[J]. Torrential Rain and Disasters, 2019, 38(3): 267-275.]

[23] 陈彦光. 地理数学方法: 基础和应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 40-59. [Chen Yanguang. Mathematical methods for geography: Foundations and applications[M]. Beijing: Science Press, 2010: 40-59.]

[24] 徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 第二版. 北京: 高等教育出版社, 2002: 37-46. [Xu Jianhua. Mathematical methods in modern geography[M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2002: 37-46.]

[25] 刘星. 新疆灾荒史[M]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 1999: 1-10. [Liu Xing. History of disasters in Xinjiang[M]. Urumqi: Xinjiang People's Publishing House, 1999: 1-10.]

[26] 沈永平, 苏宏超, 王国亚, 等. 新疆冰川、积雪对气候变化的响应(I): 水文效应[J]. 冰川冻土, 2013, 35(3): 513-527. [Shen Yongping, Su Hongchao, Wang Guoya, et al. The responses of glaciers and snow cover to climate change in Xinjiang(I): Hydrological effects[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(3): 513-527.]

[27] 施雅风, 沈永平, 李栋梁, 等. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨[J]. 第四纪研究, 2003, 23(2): 152-164. [Shi Yafeng, Shen Yongping, Li Dongliang, et al. Discussion on the present climate change from warm-dry to warm-wet in northwest China[J]. Quaternary Sciences, 2003, 23(2): 152-164.]

[28] Fang G H, Li Z, Yang J, et al. Changes in flooding in the alpine catchments of the Tarim River Basin, Central Asia[J]. Journal of Flood Risk Management, 2023, 16(1): e12869, doi: 10.1111/jfr3.12869.

[29] Zhang Q F, Chen Y N, Li Z, et al. Recent changes in water discharge in snow and glacier melt-dominated rivers in the Tienshan Mountains, Central Asia[J]. Remote Sensing, 2020, 12(17): 2704, doi: 10.3390/rs12172704.

[30] 毛炜峄, 樊静, 沈永平, 等. 近50 a来新疆区域与天山典型流域极端洪水变化特征及其对气候变化的响应[J]. 冰川冻土, 2012, 34(5): 1037-1046. [Mao Weiyi, Fan Jing, Shen Yongping, et al. Variations of extreme flood of the rivers in Xinjiang region and some typical watersheds from Tianshan Mountains and the response to climate change in recent 50 years[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, 34(5): 1037-1046.]

[31] 沈永平, 丁永建, 刘时银, 等. 近期气温变暖叶尔羌河冰湖溃决洪水增加[J]. 冰川冻土, 2004, 26(2): 234. [Shen Yongping, Ding

Yongjian, Liu Shiyin, et al. An increasing glacial lake outburst flood in Yarkant River, Karakorum in past ten years[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2004, 26(2): 234.]

[32] 周京武, 高鹰, 沈永平, 等. 天山南坡黄水沟与清水河寒区流域极端水文事件对气候变化的响应[J]. 冰川冻土, 2014, 36(4):

[33] 沈永平, 王国亚, 丁永建, 等. 百年来天山阿克苏河流域麦茨巴赫冰湖演化与冰川洪水灾害[J]. 冰川冻土, 2009, 31(6): 993-1002. [Shen Yongping, Wang Guoya, Ding Yongjian, et al. Changes in Merzbacher Lake of Inylchek Glacier and glacial flash floods in Aksu River Basin, Tianshan during the period of 1903—2009 [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2009, 31(6): 993-1002.]

[34] 沈永平. 1999年夏季新疆发生特大洪水灾害[J]. 冰川冻土,

1042-1048. [Zhou Jingwu, Gao Ying, Shen Yongping, et al. Response of extreme hydrological events to climate change in cold watersheds of Huangshuigou River and Qingshuigou River on the southern slope of Tianshan[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(4): 1042-1048.]

2000, 22(2): 134. [Shen Yongping. The summer of 1999, a major flood disaster in Xinjiang[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2000, 22(2): 134.]

[35] 何慧. 从1999年叶尔羌河和克孜河洪水看新疆河流水情变化趋势[J]. 新疆气象, 2001, 24(6): 18-20. [He Hui. Analysis on variation tendency of river in Xinjiang on the basis of flood of Yeerqiang River and Kezi River in 1999[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2001, 24(6): 18-20.

Evolution law and causes of floods in the four sources streams of Tarim River

WU Xiaodan[1,2], LUO Min[1,2], MENG Fanhao[1,2], SA Chula[1,2], DONG Jinyi[1,2], LIU Tie[3]

(1. College of Geographical Science, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, Inner Mongolia, China; 2. Inner Mongolia Key Laboratory of Remote Sensing & Geography Information System, Hohhot 010022, Inner Mongolia, China; 3. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China)

Abstract: Based on temperature, precipitation, and snow depth data from five hydrological stations in four sources of the Tarim River Basin of Xinjiang, China, from 1981 to 2020, flood magnitude, frequency, and peak time were analyzed using maximum and peak-over-threshold (POT) sampling methods. Moreover, correlation analysis was performed to reveal the relationship between different flood indicators and influencing factors and identify key influencing factors. The results show the following: (1) From 1981 to 2020, the peak discharge of each hydrological station in “four sources” of the Tarim River Basin is as follows: Kaqung>Xehera>Tongguzlok>Sharikilank>Daschankou. The annual and seasonal flood peak discharge generally exhibited an increasing trend, and the occurrence time of the flood peak in winter exhibited an earlier state, among which the average annual advance of Sharikilank was 2.61 days, whereas that of the Kaqung station was only 0.67 days. (2) There were two periods of high flooding in the Tarim River Basin, namely, 1994—2002 and 2006—2011, with several flood occurrences in the Tarim River Basin after 1990. (3) The minimum temperature, precipitation, and snow depth at different times before the floods mainly exhibited an increasing trend, while the maximum temperature mainly exhibited a decrease. The highest correlation was found between spring flood indicators and maximum 3-day precipitation, whereas the highest correlation was found between autumn flood indicators and maximum 7-day precipitation. The correlation between multi-day precipitation and flood indicators was higher than that between single-day precipitation and flood indicators. Among the snow depth-related factors, the maximum 15-day snow depth had the highest correlation with spring flood indicators at each station. These findings provide a theoretical basis for regional water resource management and flood disaster prediction.

Key words: flood; recurrence period; POT sampling; four sources streams of Tarim River